



Hacia una movilidad urbana más eficiente: Análisis semafórico modelado con líneas de espera

Rodrigo Compañ Sarmiento ^a
Janeth Rodríguez Campechano ^b
Valeria de Jesús Lorenzo Gamboa ^c
Nayeli Sareli Cantero García ^d
Estefany Bichi Delgado ^e

Resumen – Este estudio aborda la optimización del tráfico vehicular en una intersección de la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca, aplicando un modelo de líneas de espera (M/M/S) y simulación Monte Carlo. Se realizaron observaciones en campo para obtener datos sobre tiempos de llegada de vehículos y tiempos de servicio de semáforos. Se calcularon las medidas de desempeño del modelo con las tasas de llegada, tasas de servicio y utilización del sistema. Posteriormente, se simuló el comportamiento del flujo vehicular bajo diferentes escenarios, identificando puntos de saturación. Los resultados muestran que, con tasas de llegada constantes, el sistema opera de manera estable. Sin embargo, con tasas de llegada máximas, ciertas vías comienzan a saturarse. Estos hallazgos sientan las bases para optimizar los tiempos de sincronización de los semáforos en fases posteriores del proyecto.

Palabras clave – Optimización, Líneas de Espera, Simulación, Semáforos, Movilidad Urbana.

Abstract – This study addresses the optimization of vehicular traffic at an intersection in the city of Tuxtepec, Oaxaca, by applying a queueing model (M/M/S) and Monte Carlo simulation. Field observations were conducted to obtain data on vehicle arrival times and traffic light service times. The performance measures of the model were calculated using arrival rates, service rates, and system utilization. Subsequently, the behavior of the traffic flow was simulated under different scenarios, identifying saturation points. The results show that, with constant arrival rates, the system operates stably. However, with maximum arrival rates, certain roads begin to saturate. These findings lay the groundwork for optimizing traffic light synchronization times in later phases of the project.

Keywords – Optimization, Queuing Theory, Simulation, Traffic Light, Urban Mobility.

CÓMO CITAR HOW TO CITE:

Compañ Sarmiento, R., Rodríguez Campechano, J., Lorenzo Gamboa, V. de J., Cantero García, N. S., & Bichi Delgado, E. (2024). Hacia una movilidad urbana más eficiente: Análisis semafórico modelado con líneas de espera. *Interconectando Saberes*, (18), 15-24.
<https://doi.org/10.25009/is.v0i18.2887>

Recibido: 27 de mayo de 2024
Aceptado: 24 de octubre de 2024
Publicado: 25 de octubre de 2024

^a Tecnológico Nacional de México - Tuxtepec, México. E-mail: comsar82@gmail.com

^b Tecnológico Nacional de México - Tuxtepec, México. E-mail: L22350579@tuxtepec.tecnm.mx

^c Tecnológico Nacional de México - Tuxtepec, México. E-mail: L22350676@tuxtepec.tecnm.mx

^d Tecnológico Nacional de México - Tuxtepec, México. E-mail: L22350677@tuxtepec.tecnm.mx

^e Tecnológico Nacional de México - Tuxtepec, México. E-mail: L22350671@tuxtepec.tecnm.mx



INTRODUCCIÓN

La movilidad urbana eficiente es un aspecto crucial para mejorar la calidad de vida en las ciudades. En este contexto, la optimización del tiempo de los semáforos juega un papel fundamental en la gestión del tráfico y la reducción de la congestión vehicular. Según Marcillo et al. (2022), la implementación de tecnologías modernas de monitoreo y análisis de datos puede proporcionar información valiosa sobre los patrones de tráfico en intersecciones clave, lo que a su vez permite ajustar los tiempos de los semáforos para optimizar la sincronización y reducir los tiempos de espera. Este enfoque tiene como objetivo principal mejorar la movilidad urbana y aumentar la seguridad vial para la ciudad.

La teoría de líneas de espera es una herramienta fundamental en el análisis del tráfico y el control de semáforos, utilizada tanto para describir y analizar el tráfico en carreteras como para desarrollar esquemas de control de semáforos en intersecciones viales (Elbaum et al., 2022). Su uso ofrece valiosas herramientas para analizar el flujo vehicular y optimizar la sincronización semafórica, lo que puede reducir los congestionamientos y mejorar la fluidez del tráfico.

Como afirma Soto (2020), el embotellamiento de autos en el tráfico es un problema complejo que afecta a muchas ciudades en todo el mundo, tiene múltiples causas y consecuencias. Puede ser causado por una variedad de factores, incluyendo el aumento del número de vehículos en las carreteras, la falta de infraestructura vial adecuada para manejar el flujo de tráfico, la congestión en puntos críticos como intersecciones y accesos a autopistas, accidentes de tráfico, condiciones climáticas adversas, y la falta de planificación urbana

eficaz. Dicho problema se ha derivado desde algunos años atrás y ha ido aumentando en gran parte del mundo, afectando la movilidad de las personas y mercancías, teniendo también consecuencias e impactos en la economía, medio ambiente y salud.

Además, la optimización de los tiempos de los semáforos no solo tiene beneficios en términos de movilidad y seguridad vial, sino que también puede tener impactos económicos positivos. Como señala Zhang et al. (2021), al mejorar la eficiencia del transporte y reducir los costos asociados con la congestión, se pueden esperar beneficios económicos significativos. Sin embargo, para implementar con éxito estas medidas, será crucial la colaboración entre autoridades municipales, expertos en movilidad y la comunidad local para garantizar su efectividad y aceptación.

De acuerdo con el INEGI (s.f), en el estado de Oaxaca existen 892,937 unidades entre vehículos particulares, oficiales, transporte público, camiones y motociclistas, es decir, hay un vehículo por cada 5 personas. Según los datos de la dirección de obras públicas municipal en el municipio de san Juan Bautista Tuxtepec, cuenta con 160 semáforos instalados, con 30 cruces Mundaca (2024).

Citando a Reyna (2015), el semáforo es un dispositivo eléctrico que gestiona y regula el tránsito de vehículos y peatones. Entre sus principales funciones se encuentran la interrupción periódica del flujo vehicular o peatonal para permitir el paso de otro, la regulación de la velocidad vehicular para mantenerla constante y el control de la circulación por carril. Además, su objetivo es disminuir la cantidad de accidentes, particularmente las colisiones perpendiculares. Este instrumento es fundamental para la organización del tráfico urbano,

incrementando tanto la seguridad vial como la eficiencia en el movimiento del tráfico.

Esta investigación tiene como objetivo abordar la problemática del congestionamiento vial y proponer una solución óptima que sirva como instrumento de consulta para el diseño urbano. Se realizarán visitas a diversos cruces de la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca, con semáforos que presentan mayores niveles de embotellamiento. El propósito principal de esta primera fase de la investigación es aplicar un modelo de líneas de espera que permita predecir el comportamiento del flujo vehicular para prevenir embotellamientos. En las siguientes fases se analizará el problema de sincronización de semáforos.

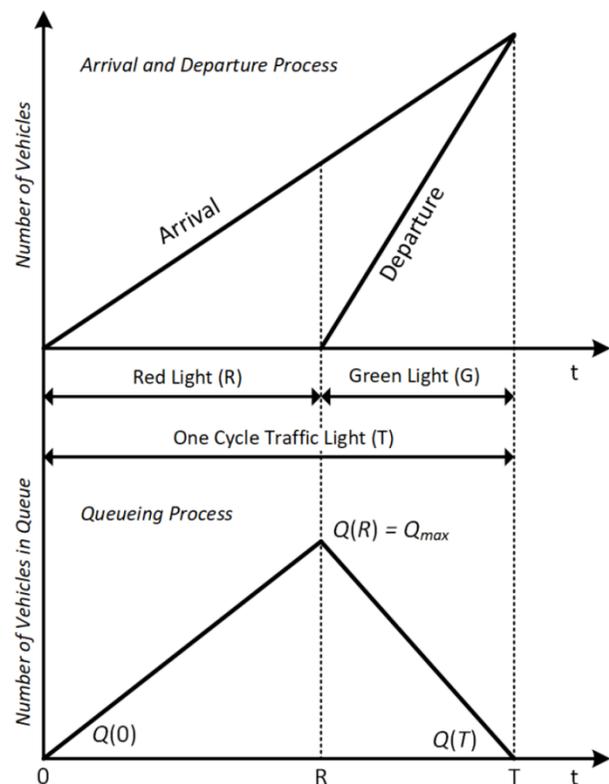
MATERIALES Y MÉTODOS

La teoría de colas se utiliza ampliamente para modelar y analizar los tiempos de espera en intersecciones de tráfico controladas por semáforos. Existen numerosas publicaciones en las que se aborda el tema, tal es el caso de Harahap et al. (2019) que propusieron un modelo de líneas de espera en una intersección con semáforos, donde se determinan los tiempos de duración apropiados de las luces roja y verde en función de la llegada de vehículos. En el modelo propuesto ilustran el tiempo de espera de vehículos en una intersección de semáforo como se observa en la figura 1.

Según Vargas-Sánchez et al. (2020), el modelo M/M/s es un modelo de colas específico. En la notación de Kendall, este modelo se caracteriza por tener llegadas que siguen una distribución exponencial con una tasa media de $1/\lambda$ y cuenta con s servidores.

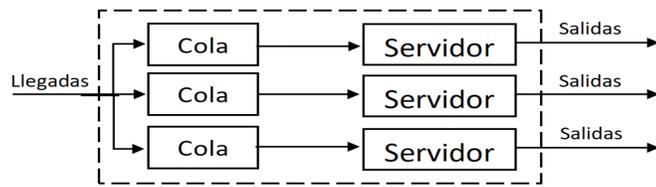
Figura 1

Modelo de tiempo de espera vehicular en una intersección con semáforo



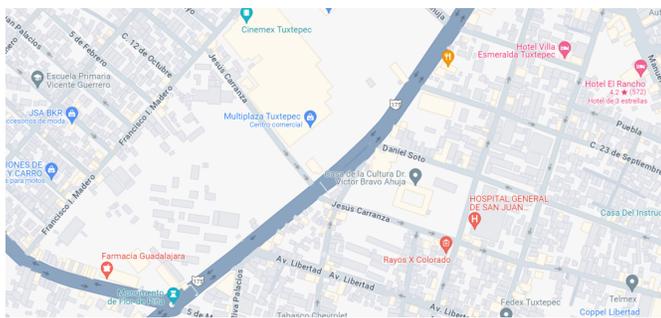
Nota: Tomado de Harahap et al., 2019 p. 4. (Modeling and Simulation of Queue Waiting Time at Traffic Light Intersection- Journal of Physics: Conference Series).

Este modelo es utilizado para analizar sistemas con múltiples servidores y flujos de llegada y servicio variables. Es particularmente útil en la gestión de tráfico vehicular en cruces con semáforos, donde los vehículos llegan a un cruce y deben esperar a ser atendidos por los semáforos. El objetivo de la aplicación de este modelo es obtener las medidas de desempeño del sistema que permitan predecir el comportamiento del flujo vehicular y optimizar los tiempos de espera para minimizar el congestionamiento vehicular en los cruces.

Figura 2*Modelo de múltiples servidores*

Para aplicar el modelo MMS a los semáforos en el cruce de Tuxtepec, Oaxaca, se siguieron los siguientes pasos:

1. Selección de Cruce: El cruce del Boulevard Benito Juárez con la Avenida Jesús Carranza ha sido identificado como uno de los puntos de mayor afluencia vehicular en la ciudad de Tuxtepec. Este punto constituye un nodo crucial en la red de tráfico de la ciudad, proporcionando datos valiosos sobre el flujo vehicular y los patrones de congestión. La ubicación de este cruce se presenta en la figura 3.

Figura 3*Crucero Blvd. Benito Juárez y Av. Jesús Carranza.*

Nota: Adaptado de Google, <https://www.google.com.mx/maps/@18.0878724,-96.1321897,17z?entry=ttu>, Todos los derechos reservados 2024 por Google.

2. Muestreo Aleatorio: Se realizó una visita de campo al cruce seleccionado. Se recopilieron datos sobre los tiempos de llegada de los vehículos y los tiempos de servicio de los semáforos mediante técnicas de muestreo

aleatorio. Pereyra et al (2021) plantea que el muestreo aleatorio simple es una técnica básica en la que cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionado. Esto asegura la aleatorización de factores no controlados por el investigador, minimizando su influencia en los resultados. Además, previene la introducción de sesgos y la dependencia entre observaciones.

Los datos obtenidos se analizaron utilizando el modelo MMS para calcular los parámetros clave del sistema de tráfico, como la tasa de llegada de vehículos, la tasa de servicio y el número de servidores (S). Estos cálculos permiten estimar el tiempo promedio de espera de los vehículos y la longitud promedio de las colas en los cruces.

La primera fase de la investigación se centra en la aplicación del modelo de líneas de espera para entender el comportamiento del flujo vehicular en los cruces seleccionados y mediante simulación prever posibles embotellamientos. Este análisis sirve como base para las siguientes fases de la investigación. En las siguientes fases, se aborda el cálculo de los tiempos de sincronización de semáforos. Esto implicará el desarrollo de algoritmos de optimización que ajusten los intervalos de luz verde y roja para cada dirección, con el fin de minimizar el tiempo de espera total y mejorar el flujo vehicular.

Mediante la aplicación del modelo y la posterior optimización de los tiempos de semáforos, se busca desarrollar una solución efectiva al congestionamiento vial en Tuxtepec, Oaxaca.

RESULTADOS

Se tomó una muestra de 300 observaciones en cada semáforo para calcular la tasa de llegadas y servicio. Para determinar la duración del ciclo del semáforo, se midieron los tiempos de las luces verde, amarilla y roja, así como el tiempo del paso peatonal. Las mediciones de estos tiempos se presentan en la figura 4.

Una vez que se tomó la muestra con las 300 observaciones, se analizaron los resultados, mediante los estadísticos descriptivos con el uso de software, como se observa en la Tabla I.

Figura 4

Ciclo de semáforos

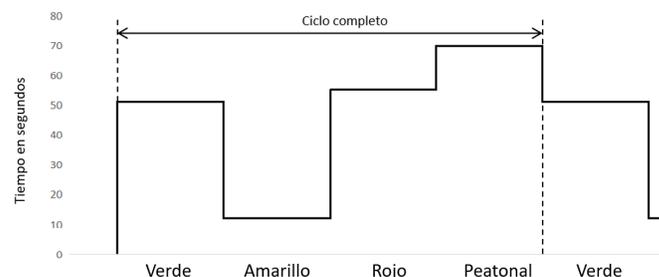


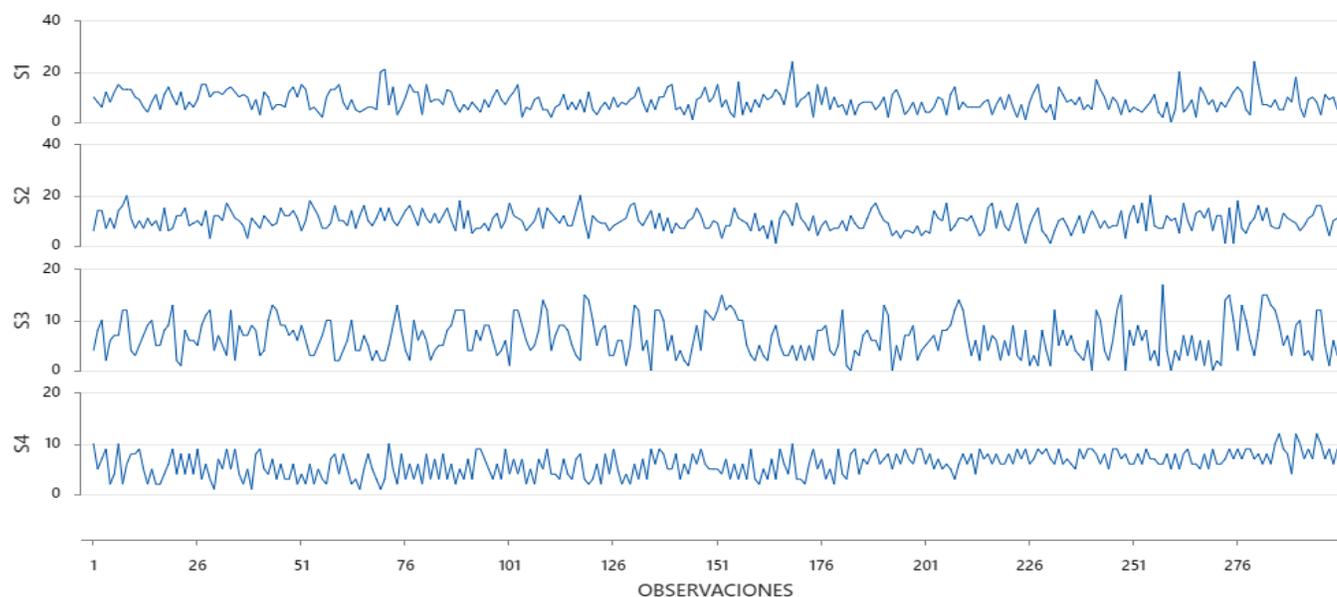
Tabla I

Resumen de estadísticos descriptivos

Variable	Media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
LLEGADAS S1	8.36	4.01132	0	5	8	11	24
LLEGADAS S2	9.95667	3.78098	1	7	10	12	20
LLEGADAS S3	6.49333	3.77059	0	4	6	9	17
LLEGADAS S4	5.98333	2.41298	1	4	6	8	12
SERVICIO S1	18.6129	3.81818	10	15	19	21	24
SERVICIO S2	11.3226	3.62755	5	8	11	14	20
SERVICIO S3	3.45161	1.60911	1	2	3	5	7
SERVICIO S4	9.45161	3.30493	4	7	9	12	15

Figura 5

Llegadas al cruce por semáforo



Para analizar los patrones de llegada de vehículos a la intersección, los datos recolectados se graficaron como se puede apreciar en la figura 5, donde el eje X representa el número de observación y el eje Y muestra la cantidad de vehículos que arribaron al cruce. Esta grafica permitió identificar la variabilidad en las tasas de llegada. Períodos de alta demanda se manifestaron como picos, mientras que los valles representaron momentos de baja afluencia. Esta representación visual facilitó el análisis posterior, al brindad una perspectiva clara de la intensidad del tráfico entrante a la intersección regulada por el semáforo en diferentes momentos.

Para calcular las medidas de desempeño del modelo MMS (Servidores Múltiples), se consideran tres parámetros fundamentales: la tasa de llegada de los clientes al sistema (λ), la tasa de servicio de cada servidor (μ) y el número total de servidores disponibles. En este contexto, para el modelo específico, se utilizan múltiples servidores, con una tasa de llegada de 7.7 clientes por unidad de tiempo (Arrival rate), una tasa de servicio de 8.08 clientes atendidos por unidad de tiempo (Service rate) y un total de 4 servidores disponibles, estos parámetros son críticos para determinar la eficiencia y el rendimiento del sistema de colas en términos de tiempos de espera, utilización de servidores y otros indicadores del desempeño. Utilizando el software QM for Windows se calcularon las medidas de desempeño, ver figura 6.

Figura 6

Medidas de desempeño del sistema

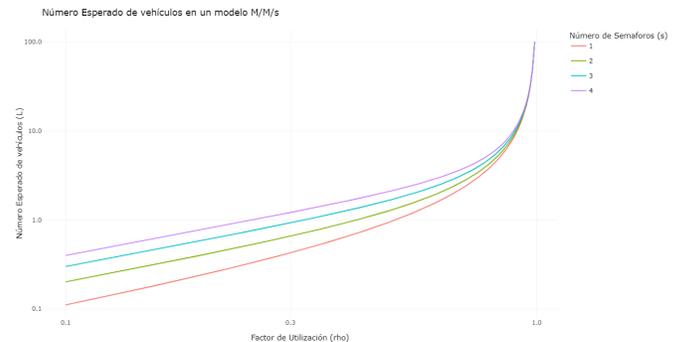
Parameter	Value	Parameter	Value	Minutes	Seconds
M/M/s		Average server utilization	.24		
Arrival rate(λ)	7.7	Average number in the queue(Lq)	.01		
Service rate(μ)	8.08	Average number in the system(L)	.96		
Number of servers	4	Average time in the queue(Wq)	0	.04	2.54
		Average time in the system(W)	.12	7.47	448.09

Nota: Elaboración propia con software QM for Windows V. 5.2

Se graficó el número esperado de vehículos para cada semáforo comparado con el factor de utilización como se observa en la figura 7.

Figura 7

Número esperado de vehiculos por semáforo

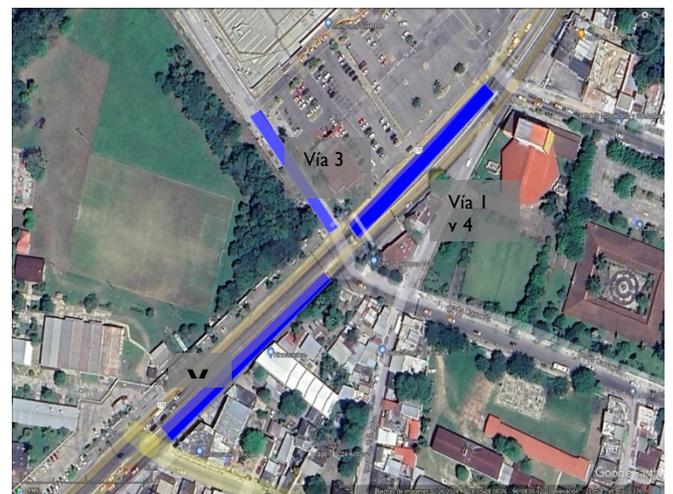


SIMULACIÓN

Se simuló el cruce Vehicular ubicado en el Blvd. Benito Juárez y Carranza. Con latitud: 18° 5'16.19"N y longitud: 96° 7'56.96"O.

Figura 8

Medidas de desempeño del sistema



Nota: Adaptado de Google Earth 2024

La simulación se realizó considerando los siguientes parámetros:

- Tiempo luz verde (vía 1, 2, 3 y 4)
- Tiempo luz amarilla (vía 1, 2, 3 y 4)
- Tiempo luz roja (vía 1, 2, 3 y 4)
- Tiempo semáforo peatonal
- Tasa de llegadas de vehículos
- Tasa de servicios (promedio de vehículos que pasan en la luz verde)
- Embotellamiento (cuando una vía sobrepasa su capacidad)

Para calcular la capacidad de cada vía, se midieron las vías y se consideró la cantidad de carriles. Luego, se utilizó una longitud promedio de 4 metros por vehículo y un espacio entre vehículos de 4 metros, según se menciona en el trabajo de Fajardo (2022, p. 40).

- Longitud vía 1: 120m
- Longitud vía 2: 140m
- Longitud vía 3: 80m
- Longitud vía 4: 120m

Capacidad de vehículos de las vías:

$$C_{Vía 1} = \frac{120m}{8m/vehículo} * 2(\text{carriles}) = 30 \text{ vehículos}$$

$$C_{Vía 2} = \frac{140m}{8m/vehículo} * 3(\text{carriles}) = 52.5 \text{ vehículos}$$

$$C_{Vía 3} = \frac{80m}{8m/vehículo} * 2(\text{carriles}) = 20 \text{ vehículos}$$

$$C_{Vía 4} = \frac{120m}{8m/vehículo} * 1(\text{carril}) = 15 \text{ vehículos}$$

Los modelos macroscópicos, como el presentado por Pérez et al. (2014), representan una herramienta valiosa para abordar el fenómeno del tráfico vehicular. En estos modelos, las variables principales, tales como el tamaño de los vehículos y la distancia de separación entre ellos, se promedian debido a su comportamiento estadístico

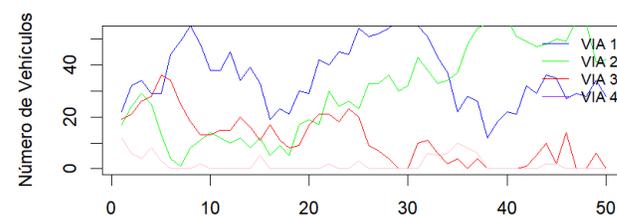
La simulación se realizó en Rstudio aplicando el método Monte Carlo. La simulación Montecarlo es un método estadístico numérico que permite la generación de una gran cantidad de variables aleatorias para llegar a resultados parecidos a los reales, de acuerdo con Gandica de Roa (2020, p. 111).

De acuerdo con Hair et al. (2021) R es un software gratuito y de código abierto que permite a los usuarios escribir y ejecutar código para el análisis de datos. Su naturaleza de código abierto facilita la reproducibilidad, compatibilidad y escalabilidad del código, y cuenta con una comunidad activa que lo apoya y mejora continuamente. Estas características integradas permiten organizar, desarrollar, depurar y visualizar eficientemente las simulaciones de Monte Carlo de sistemas de líneas de espera realizadas en R para este proyecto de investigación.

Se simularon 50 ciclos de semáforo equivalentes a 4:04:21:51 H:mm:ss:sss. El resultado se observa en la figura 9.

Figura 9

Simulación del sistema en 50 ciclos

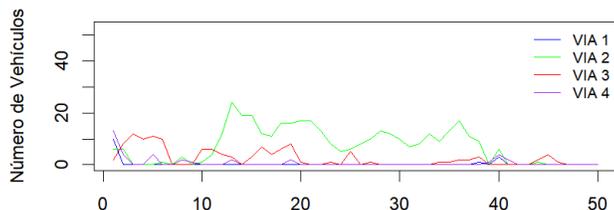


Nota: Fuente elaboración propia con Rstudio

Como puede observarse la vía 3 se satura al cabo más de 20 ciclos. Esto debido a la baja tasa de servicio. Esto puede ser engañoso, ya que en el muestreo realizado la tasa de llegada era baja debido a que había poco flujo Vehicular. Por lo que se realiza un ajuste en cuanto a esa vía tomando como base los otros 2 semáforos. El resultado se aprecia en la figura 10.

Figura 10

Simulación con tasa de llegadas ajustada

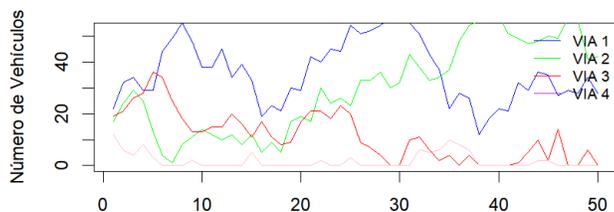


Nota: Fuente elaboración propia con Rstudio

Como se observa después de 50 ciclos, no existe saturación de las vías. Siempre que la tasa de llegada sea constante, lo cual no sucede. Considerando la máxima tasa de llegadas se realiza nuevamente la simulación, esto ya que podría suceder que en algún momento se tenga una tasa llegadas máxima, esto podría ocurrir en los horarios de mayor flujo Vehicular. El resultado se observa en la figura 11.

Figura 11

Simulación con tasa de llegadas máxima



Nota: Fuente elaboración propia con Rstudio

Como puede observarse la vía 1 y 2 comienzan a saturarse con una tasa de llegadas máxima.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta primera fase de la investigación brindan información valiosa sobre el comportamiento del flujo vehicular en el cruce analizado. El uso del modelo de líneas de espera (M/M/S) y la simulación Monte Carlo permitieron evaluar el desempeño del sistema y detectar posibles puntos de saturación.

Uno de los hallazgos clave es que, con tasas de llegada constantes, el sistema opera de manera estable, sin saturación significativa. Sin embargo, cuando se simularon tasas de llegada máximas, representativas de períodos de alta demanda, ciertas vías comenzaron a saturarse. Esto indica la necesidad de ajustar los tiempos de sincronización de los semáforos para adaptarse a estas fluctuaciones en la demanda y garantizar un flujo vehicular más eficiente.

Es importante destacar que los resultados de esta fase se basan en observaciones y muestreos realizados en un momento específico. Para obtener una imagen más completa del comportamiento del tráfico, sería recomendable realizar observaciones adicionales en diferentes horarios y días de la semana, capturando así la variabilidad inherente al flujo vehicular.

Además, es fundamental considerar otros factores que pueden influir en el flujo de tráfico, como la presencia de peatones, la geometría de la intersección, la señalización y las condiciones climáticas. Estos aspectos pueden incorporarse en las siguientes fases del proyecto para obtener un modelo más robusto y preciso.

CONCLUSIONES

Esta investigación representa un paso importante en la optimización del tráfico vehicular en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. Al aplicar el modelo de líneas de espera (M/M/S) y la simulación Monte Carlo, se ha logrado evaluar el desempeño del sistema y detectar posibles puntos de saturación en una intersección clave.

Los resultados obtenidos en esta primera fase sientan las bases para las siguientes etapas del proyecto, donde se abordarán el cálculo y la optimización de los tiempos de sincronización de los semáforos. Ajustar estos tiempos de manera adecuada será fundamental para reducir los tiempos de espera, mejorar el flujo vehicular y abordar los problemas de congestión en la ciudad.

Además, este estudio destaca la importancia de utilizar técnicas cuantitativas y herramientas de modelado para abordar desafíos complejos como la gestión del tráfico urbano. Al combinar datos empíricos con modelos matemáticos y simulaciones, se pueden obtener insights valiosos y soluciones más efectivas.

En resumen, esta investigación ha sentado las bases para una gestión más eficiente del tráfico en Tuxtepec, Oaxaca, y puede servir como referencia para futuros proyectos de optimización de movilidad urbana en otras ciudades.

REFERENCIAS

- Elbaum, Y., Novoselsky, A., & Kagan, E. (2022). A queueing model for traffic flow control in the road intersection. *Mathematics*, 10(3997). <https://doi.org/10.3390/math10213997>
- Gandica de Roa, E. (2020). Potencia y robustez en pruebas de normalidad con simulación Montecarlo. *Revista Científic*, 5(18), 108-119. <https://doi.org/10.29394/Scientific.issn.2542-2987.2020.5.18.5.108-119>

- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). *Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) using R*. En *Classroom companion: Business*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7>
- Harahap, E., Darmawan, D., Fajar, Y., Ceha, R., & Rachmatie, A. (2019). Modeling and simulation of queue waiting time at traffic light intersection. *Journal of Physics: Conference Series*, 1188, 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1188/1/012001>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s.f.). *Transportes*. <https://www.inegi.org.mx/temas/transportes>
- Marcillo, P., Valdivieso Caraguay, Á. L., & Hernández-Álvarez, M. (2022). A systematic literature review of learning-based traffic accident prediction models based on heterogeneous sources. *Applied Sciences*, 12(9), 4529. <https://doi.org/10.3390/app12094529>
- Mundaca, A. (2024, 20 de enero). Luces en forma de piña, la nueva identidad de los semáforos en Tuxtepec, Oaxaca. *Oaxaca*. <https://oaxaca.eluniversal.com.mx/municipios/luces-en-forma-de-pina-la-nueva-identidad-de-los-semaforos-en-tuxtepec-oaxaca>
- Murillo Fajardo, J. P. (2022). *Desarrollo de un modelo matemático a través de procesos estocásticos para optimizar el tráfico vehicular en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.
- Pereyra, L. C., & Vaira, M. (2021). *Diseño de muestreo*. Universidad Nacional de Jujuy, 23-32.
- Pérez, F., Bautista, A., Salazar, M., & Macias, A. (2014). Analysis of vehicular traffic flow using a macroscopic model. *DYNA*, 81(184), 36. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.38650>
- Reyna, P. (2015). *Propuesta de mejora de niveles de servicio en dos intersecciones*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/581516>
- Soto, M. J. (2020). *La congestión vial en la Ciudad de México: Retos de la planeación urbana*.
- Vargas-Sánchez, J. J., Causado, E., & Mercado, H. (2020). Estimadores bayesianos de distribuciones Weibull aplicados a un modelo de líneas de espera G/G/s. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 30, 142-162. <https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconomia.2971>

Zhang, S., Guo, Y., Zhao, P., Zheng, C., & Chen, X. (2021). A graph-based temporal attention framework for multi-sensor traffic flow forecasting. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 7743-7758. <https://doi.org/10.1109/tits.2021.3072118>